

클래스 D 100W+ 오디오 전력 증폭기로 효율 증대

부피가 크고, 무겁고 값비싼 옛날의 비효율적인 리니어 전원 장치 대신 고주파수, 고효율의 스위칭 전원 장치 부품들로 교체되면서, 클래스 D는 앞으로 중간 전력 클래스 AB 오디오 증폭기를 대체할 준비를 갖추었다. 이 글에서는 중간 전력 레벨을 위한 클래스 D vs. 클래스 AB의 성능, 크기, 비용의 장점에 대해 다룬다.

글 | 알렉스 미할카(Alex Mihalka), 인터내셔널 렉티파이어

배터리 구동식 디바이스에서 클래스 D 오디오 증폭의 효율과 크기 장점은 잘 알려져 있다. 이러한 장점들은 증폭기를 최대 500W까지 확장시켜, 클래스 D를 위해 특별히 설계된 솔리드 스테이트 드라이버 IC를 가능하게 한다. 이러한 새로운 IC에 기반한 시스템은 THD+N 측정에서 클래스 AB보다 성능이 훨씬 우수하며, 접지 기반형 아날로그 오디오 입력을 수용함으로써 설계자의 작업을 단순화시킨다.

레일과 프로그래머블 데드 타임 모두를 위한 과전류 보호와 같은 기능들은 이러한 드라이버를 더욱 매력적으로 만든다. 여기에서는 중간 전력 레벨을 위한 클래스 D vs. 클래스 AB의 성능, 크기, 비용의 장점에 대해 다루고자 한다.

역사적 배경

오디오 증폭은 스피커(소위 드라이버로 불림)가 반대 방향에서 앞 뒤로 구동되어, 사람의 귀가 판독할 수 있는 음파를 만들어 대기에 이동시키는 것을 요구한다. 이것을 달성하기 위해, 극성을 교

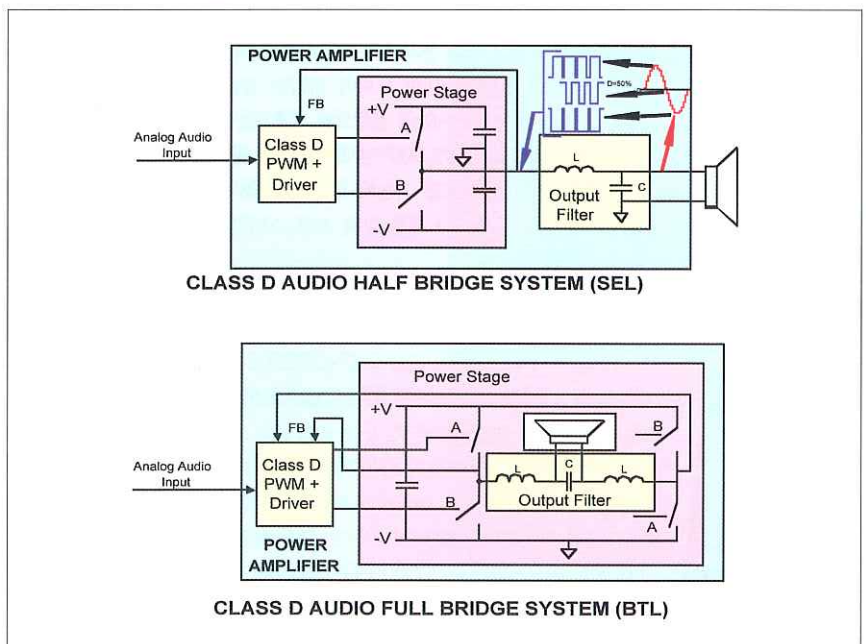
류시키는 전압은 그림 1에서 보는 것처럼 클래스 D 토폴로지를 위해 하프 브리지 혹은 풀 브리지의 방법으로 스피커에 부과된다.

하프 브리지 증폭기는 스플리트 레일 전원 공급장치(Split Rail Power Supply)를 요구하며, 동일 크기의 포지티브 및 네거티브 전압을 가지며, 이들 사이의 2

개의 전력 스위치를 갖는다. 부하가 공통적인 스위치 포인트 및 시스템 접지 사이에 묶일 때, 이것은 SEL(Single-Ended Load)로 언급된다. BTL(Bridge-Tied Load)로 언급되는, 풀 브리지 증폭기는 센터 포인트 사이에서 묶여진 부하를 갖춘 2개의 하프 브리지로 구성된다.

이 스위치들은 스피커가 오디오 출력

그림 1. 파워 증폭기 토폴로지



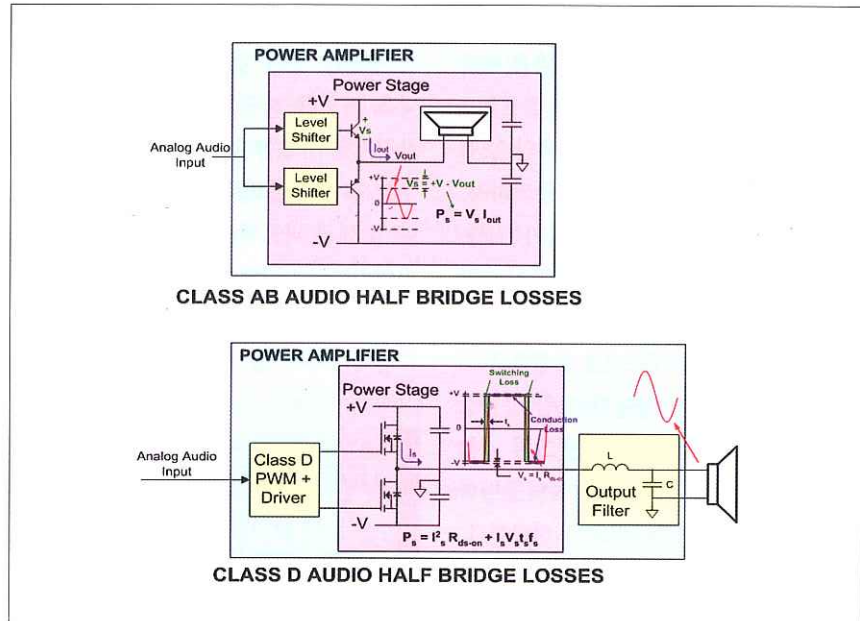
을 재생하기 위해 이동되는 방식으로 턴 온 및 오프 되며, 이것은 제로로 평균화된다. BTL 컨피규레이션은 주어진 스위치 레이팅(Switch Rating)을 위해 더 높은 전력을 생산하며, 단일 전원 공급장치 및 출력 커패시터는 주어진 스위치 레이팅을 접지 레퍼런스할 수 있게 해, 2개 이상의 전력 스위치 및 게이트 드라이브의 비용에서 입력 제어를 단순화시킨다. SEL 혹은 BTL 토폴로지는 클래스 AB 또는 클래스 D를 위해 사용된다.

클래스 A는 가장 초기의 오디오 증폭기 설계였다. 따라서, 스위치 모두는 동시에 ON 상태가 완전히 아니더라도, 부하에서 필수 전압을 생성한다(그림 2). 클래스 A는 뛰어난 오디오 성능을 발휘하나, 약 15%의 열악한 효율성으로 인해 대형의 비싼 시스템을 초래하는 결과를 가져온다. 그 뒤를 따르는 클래스 B에서 한 번에 단지 하나의 스위치가 켜진다. 효율성이 대략 75%로 향상되는 반면, 출력 파형의 제로 크로싱에서 상당한 문제로 성능이 저하된다. 제로를 통해 부드럽게 크로싱 되는 것 대신, 클래스 B는 파형의 포지티브 및 네거티브 절반부 간의 플랫폼 섹션이나 제로 전압을 가지며, 왜곡이 심하다.

그러나 클래스 AB는 스위치 2개를 동시에 켜므로써 2개를 절충시킨다. 그러나 부하 전류를 이동시키지 않는 스위치는 최소한으로 온 상태가 되며, 제로 크로싱에서 이득 손실로 인해 비선형성이 매우 감소된다. 이것은 수용 가능한 레벨까지 제로 크로싱 왜곡을 향상시키며 클래스 A에 대해 효율성을 증대시킨다. 그러나 여전히 클래스 AB 효율성은 30%이다.

이러한 3가지의 토폴로지는 오디오 주파수로 브리지 출력 전압을 변화시킨다. 따라서 이 토폴로지들은 상대적으로

그림 2. 하프 프리지 손실, AB v. D



낮은 주파수 설계이다. 클래스 AB는 리니어 증폭기의 영역을 지배하며, 바이폴라 트랜지스터는 제어 디바이스로 사용된다.

클래스 D 증폭

오늘날의 스위칭 전원 공급장치는 고주파수 전력 변환의 도입으로 과거의 리니어, 라인 주파수 공급장치보다 더욱 소형, 경량의 특징이 있으며, 전력 실리콘, 제어 IC, 마그네틱, 커패시터의 향상을 실현시킨다. 이처럼, 핵심적인 전기 부품의 지속적인 향상 덕분에, 클래스 D 증폭기는 20~20kHz 오디오 주파수 신호로 선험적으로 구동되는 대신 200~800kHz에서 스위칭함으로써 오디오 증폭기의 크기, 무게, 시스템 비용을 감소시킨다. MOSFET는 고속의 스위칭 속도 때문에 스위치로써 공통적으로 사용된다.

반대편 극성의 각 전력 스위치는 ON 상태 사이에서 데드 타임으로 한번에 완

전히 턴 온되거나 턴 오프된다. $I^2 \times R_{ds-on}$ 전도 및 $V_{IS} I_{S} t_{S}$ 스위칭 손실은 리니어 클래스 AB의 $(V_{rail} - V_{out}) \times I$ 손실보다 훨씬 더 적다. 스위칭 손실이 주파수로 증가된다고 하더라도, 중간 전력을 위해 90~96%의 클래스 D 효율성이 이제 달성되었다.

클래스 D 증폭기 하프 브리지 출력은 레일-투-레일 스위치 디지털 전력 신호를 생성한다. 그림 2의 파형을 참조하자. 여기서 스위칭 손실은 초록색 영역에서 발생하며 유도 손실은 푸른 색 영역에서 발생한다. 아날로그 출력은 출력 필터의 LC 단계의 부하에서 재구성된다. 전원이 공급된 신호의 듀티 사이클 D는 그림 1 하프 브리지에서 보듯이 필터된 출력 전압을 결정한다.

D는 개체에 접근될 때 출력 전압은 파형의 포지티브 레일이나 포지티브 피크로 접근할 때, 이 때 D가 50%일 때 출력 전압은 제로이며, D가 제로일 때 출력 전압은 네거티브 레일이나 파형의 네거티

브 피크에 도달한다. 400kHz 및 그 이상의 스위칭 주파수에서, 단일 단 출력 필터가 사용될 수 있으며, 하나의 인덕터 및 하나의 커패시터로 구성된다.

사례에서 나타나듯이, 피드백인 스위치 노드에서만 나온다는 것을 주의하자. 그림 3의 THD 곡선을 달성하기 위해, 출력 필터 및 2채널 전력단 도터카드(Daughtercard)를 포함한 클래스 D 마더보드는 상업용 클래스 AB 스테레오 수신기에 플러그된다. 동일한 전원 공급장치 및 입력 제어를 갖는다면(그림 4참조), 전력 스펙과 잡음 플로어는 동일하며, 페어 측정된 성능 비교를 허락한다. 클래스 D 메탈 실장 플레이트는 원래의 클래스 AB 증폭기의 대규모 시트 싱크를 커버한다.

오렌지 색으로 나타난 클래스 D 2채널, 하프 브리지 도터카드는 히트 싱크 없이 여전히 대기 중에서 채널 당 120W에서 정격되며, 전용 클래스 D MOSFET을 가능하게 한다(예: IRF6645). 최첨단 패키징은 매우 낮은 인덕턴스를 가지며, 더욱 선명한 스위칭 파형 및 향상된 성능의 결과를 가져온다.

클래스 D 게이트 드라이버 기능

수많은 중간 전력 애플리케이션들은 더욱 저렴한 하프 브리지 전력단 vs 풀 브리지를 사용한다. 그 이유는 더욱 적은 구동 부품을 필요로 하기 때문이다. 그러나, 입력과 피드백은 네거티브 레일에 레퍼런스 되는 것보다 그라운드 접지된다면 더욱 쉽게 조작할 수 있다. 클래스 D 드라이버에서 접지된 입력 성능은 시스템 접지에 레퍼런스된 신호에서 상위 및 하위 스위치 모두를 구동시키는 레벨 시프터를 제공함으로써 설계 더욱 단순화시킨다.

클래스 D 드라이버에서 접지된 입력 성능은

시스템 접지에 레퍼런스된 신호에서 상위 및 하위 스위치 모두를 구동시키는 레벨 시프터를 제공함으로써 설계 더욱 단순화시킨다.

템 접지에 레퍼런스된 신호에서 상위 및 하위 스위치 모두를 구동시키는 레벨 시프터를 제공함으로써 설계 더욱 단순화시킨다. 필요하다면, 이러한 드라이버에 대한 입력은 SEL 모드에서 네거티브 레일로 레퍼런스될 수 있으며, 또한 BTL 컨피규레이션에서 접지될 수 있다.

중간 전력을 위한 전용 클래스 D 드라이버는 PWM이나 아날로그 오디오 입력으로 현재 이용할 수 있다. 통합형 오류 중

폭기는 펄스 폭 변조를 제공하며, 설계를 단순화시키고, 비용을 절감시키고, 밀도를 증가시키고, 외부 PWM에 대한 EMI를 제거함으로써 성능을 향상시킨다.

클래스 D 게이트 드라이버의 스위칭 주파수는 셀프-오실레이션을 위해 구성될 수 있으며, 오디오 주파수 대역(잡음 셰이핑)에서 스위칭 잡음을 제거한다. 셀프-오실레이션은 클래스 D 고정 주파수 PWM 스위칭 보다 더욱 효과적인 루프

이득을 제공하며, 고정 주파수 클래스 D 및 클래스 AB보다 향상된 성능을 제공한다. 이것은 그림 3에서 보는 것처럼 더 높은 전력 레벨에서 더욱 더 잘 들린다. 스위칭 주파수는 전력이 증가할 때 감소되어, 효율성을 보조한다. 이 기능에 대해 클래스 AB를 대체하는 제품은 없다.

클래스 D 드라이버는 두 가지 스위치가 꺼질 때 프로그래머블 데드 타임이나 타임을 제공한다. 스위치의 온-상태 간

그림 3. 클래스 AB vs 클래스 D THD + N 비교

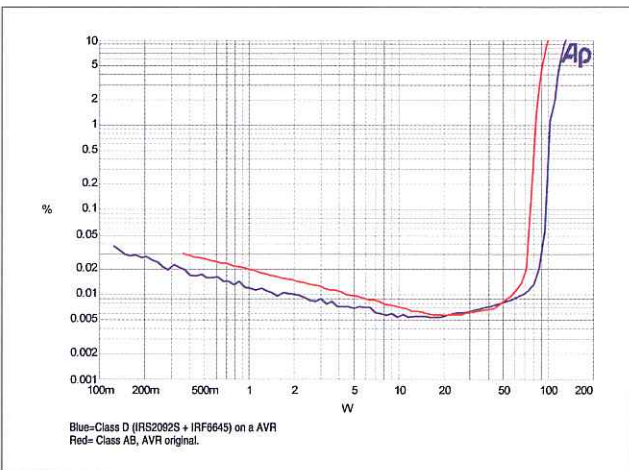
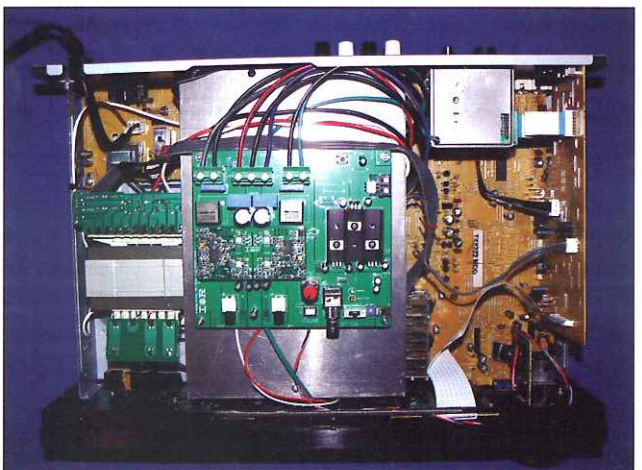


그림 4. 클래스 D 마더보드



의 시간은 적절하게 턴 온이 가능하도록 조정된다. 다양한 전력 레벨을 위해 사용되는 스위치는 전체 게이트 전하의 전체 범위를 가지며, 턴온 및 턴 오프하는 시간을 변화시키기 때문에 중요하다. 프로 그램머블 데드 타임 최적화는 THD를 감소시키고 효율성을 증대시킨다.

오디오 증폭기 설계에서 가장 힘든 부분 중의 하나는 온/오프 클릭 잡음, 또는 스피커 '팝'을 제거하는 것이다. 이것을 제거하기 위해 릴레이가 사용되기도 하며, 비용, 크기, 신뢰성이 손상된다. 클래스 D 드라이버는 클릭 잡음 감소를 통합시키고, 이 같은 단점을 상당히 감소시킨다.

보호

스위칭 오디오 증폭기를 구동하는 문제 중의 하나는 각각의 하프 브리지 스위치가 낮은 부하 임피던스나 단락 출력으로 인해 정격 전류를 초과하지 않도록 보장하는 것을 고려해야 하는 것이다. 따라서, 강력한 증폭기 설계는 레일을 위해 과전류 보호(OCP: Over Current Protection)를 포함한다. 전용 클래스 D 드라이버에서 OCP는 FET에 대해 $I_{xR_{ds-on}}$ 전압 강하를 감지함으로써 간단하게 달성되며, 전력 소비의 비간접적인 측정을 제공한다. 트립 포인트는 최소 부하 임피던스를 위해 설정되며, FET 최대 R_{ds-on} 와 온도 계수를 고려해야 한다. 내부 IC 레벨 시프팅은 회로의 오류를 제어

하는 것을 고려한다.

클래스 AB 시스템에서 OCP 회로는 제어 디바이스의 전류와 전압 모두를 모니터링해야 하며 이러한 값을 함께 멀티플라이 해야 하며, 수많은 부품이나 임피던스 브리지 사용을 요구한다. 대조적으로, 전용 클래스 D 드라이버 IC에서 OCP를 제공하는 것은 상당히 간단하며, 설계 시간을 단축시켜 주며, 신뢰성을 증가시키고, 비용을 절감시킨다.

클래스 D 드라이버는 스위치의 제어 전원 공급장치를 위한 UVLO(Under Voltage Lockout Protection)를 제공할 수 있으며 적절한 에너지가 게이트를 완전히 ON으로 구동시킬 수 있는 것을 보장한다. 게이트 전압이 너무 낮으면, 심각한 시스템 오류가 FET 과열 및 잠재적 오류의 결과를 초래할 수 있다. UVLO 보호는 이 결과가 발생하기 전에 위험한 조건을 규정함으로써 신뢰성을 향상시킨다.


비용

클래스 AB에 대한 클래스 D의 주요 장점은 동작 효율성이다. 그러나, 전력 손실 관점에서 100W 사례를 고려해보자. 클래스 AB는 70W의 열을 소비해 클래스 D의 경우 5W를 소비 하는 것과 비교된다. 14배 차이가 난다. 2개 또는 그 이상의 채널 및 열 관리로 이것을 멀티플라이하는 것은 더욱 더 중요한 설계 문제

가 된다. 클래스 AB로서 동일한 출력 전력을 위해, 클래스 D는 전력 레벨에 따라 더욱 적은 히트 싱크가 필요하거나 전력 스위치를 실장하는 경우 히트 싱크가 전혀 없거나 인건비가 전혀 없다(그림 4).

히트 싱크의 비용이 든다는 것은 기계 비용 및 설치에 대한 노동력이 든다는 것으로, 이것을 수용하기에 대규모의 인클로저가 필요하다. 레벨 시프팅과 보호 회로의 통합은 보드 공간을 감소시키고, 아날로그 입력을 수용하면서 PWM을 제공하는 전용 클래스 D 드라이버는 시스템 비용을 더욱 감소시킨다.

정리

중간 전력 오디오 증폭기에 대한 전용 클래스 D IC 드라이버는 클래스 AB보다 3배 또는 그 이상의 효율성을 실현하며 채널 당 10배 혹은 그 이상까지 전력 손실을 감소시킨다. 클래스 D 증폭기는 클래스 AB보다 동급이거나 그 이상의 성능, 고밀도, 저비용의 특징을 갖는다. 접지-레퍼런스된 아날로그나 디지털 입력, 프로그래머블 데드 타임, OCP, UVLO, 클릭 잡음 감소로 인해, 이러한 IC들은 설계하기 쉽고, 시장에 빠르게 출시할 수 있으며, 신뢰성이 높으면서 친환경적인 완전한 보호 제품을 실현한다. 부피가 크고, 무겁고 값비싼 옛날의 비효율적인 리니어 전원 장치 대신 고주파수, 고효율의 스위칭 전원 장치 부품들로 교체되면서, 클래스 D는 앞으로 중간 전력 클래스 AB 오디오 증폭기를 대체할 준비를 갖추었다. 

중간 전력 오디오 증폭기에 대한 전용 클래스 D IC 드라이버는 클래스 AB보다 3배 또는 그 이상의 효율성을 실현하며 채널 당 10배 혹은 그 이상까지 전력 손실을 감소시킨다. 클래스 D 증폭기는 클래스 AB보다 동급이거나 그 이상의 성능, 고밀도, 저비용의 특징을 갖는다.